

感性計測技術に基づく真珠品質評価 システムの開発

正員 長田典子 (三菱電機)

正員 亀井光仁 (三菱電機)

非会員 赤根正樹 (田崎真珠)

非会員 中嶋紘之 (田崎真珠)

Development of a Pearl Quality Evaluation System Based on an Instrumentation of "Kansei"

Noriko Nagata, Member, Mitsuhiro Kamei, Member (Mitsubishi Electric Corp.), Masaki Akane, Non-member, Hiroshi Nakajima, Non-member (Tasaki Shinju Co., Ltd.)

This paper proposes a new framework of an instrumentation technique, which deals with human sensibility called "Kansei", for industrial field, and reports two trials based on this framework to extract factors which decide quality of pearls. This framework consists of three stages. In the first stage, factors are extracted by analysing the responses of human experts. In the second stage, the sensing system is tentatively designed based on the factors, that is for example, to be tuned parameters using the values of proportions. In the last stage, the responses of this system are compared with those of human experts, and the differences are feedback to the first and second stages. Then the system gradually approaches human experts.

As a result of our trials in the first stage, several important factors have been extracted by using multivariate analysis and the neural networks.

キーワード：感性情報処理，真珠，多変量解析，因子分析，ニューラルネットワーク，分光スペクトル

1. ま え が き

生産工程の自動化が急速に進む中で，製品の品質評価・検査やプラント機器の監視点検などの熟練作業者の判断に依存する計測関連作業の自動化は依然として進んでいない。このような作業者の経験や直感に基づく作業の自動化を進めるためには，従来の計測手法に代わる新しい計測手法の確立がのぞまれており，正常時の状態をベースとした異常検出，多次元化，不可視情報の可視化，感性の計測などを目標とした開発が行われている⁽¹⁾。

これらの技術のうち感性の計測・評価については，従来，デザインや音楽理解といった非産業的分野において主に研究が進められてきた⁽²⁾。一方，産業分野に

おいても，近年盛んな知識工学の研究の中で論理的知識のみを扱うことの限界が指摘されると共に，感性的側面をもつ知識すなわち感性情報を獲得する重要性が次第に認識されてきており，幾つかの試みが報告されている⁽³⁾。しかしながら，産業現場での実用性を意識した開発事例はほとんどなく，従ってこれらの技術をどのようにして現場に導入していくかが今後の大きな課題となっている。

これに対して著者らは，計測技術の本来のありかたとして，センシング技術と情報処理技術が最適に役割分担をするという考え方から出発して，図1に示すような概念に基づいた感性評価システムの構築を進めている。

図1において，第一ステップでは計測対象に対する

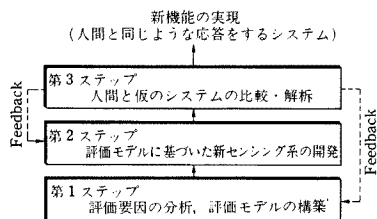


図 1 感性計測技術の概念
Fig.1. Framework of "Kansei" instrumentation.

人間の価値観を分析し評価要因を抽出する。第二ステップでは評価要因の抽出結果に基づいたセンシング系を開発し仮の計測系を構築する。更に、第三ステップで人間の評価と仮の計測系による評価結果との比較を行い、合わない部分についての評価要因の分析、計測系の再構築を行うために、結果を第一もしくは第二ステップにフィードバックする。これを繰返しながら人間の価値観を機械に移植し、人間と同じような評価あるいは応答能力をもつ機械を実現する技術をまとめて感性計測技術と呼んでいる。この手法において第一ステップでの要因抽出結果は、センシング系を構築する際の具体的な仕様として反映されるため、単に要因の分析・抽出ができたというレベルにとどまるのではなく、その要因がハードウェア的に測定可能なものか、また最適化されたものか（必要十分なものか）についても確認する必要がある、感性計測技術の最も重要なステップとなる。

本論文では、このような感性計測技術の考え方の中で、第一ステップである感性情報を抽出するための二つの方法を、試みとして真珠品質評価の定量化に適用した例について報告する。第一の方法は人間の評価構造を解析するために、多変量解析手法を用いて真珠の品質にかかわる評価要因の抽出を行うものである。第二の方法はニューラルネットワークモデルを利用して人間の評価特性を分析し、センシング系が注目すべき要因の特定を行うものである。

2. 真珠の品質評価

真珠は「東洋の神秘」と呼ばれるように独特な色と輝きをもった宝石であり、その光学的特性について古くから多くの研究者が研究を重ねてきた⁽⁴⁾⁽⁵⁾。しかしながら真珠の独特の輝きは、1,000 層以上にも及ぶ半透明の薄膜が球状にしかも天然に積層されている結果、表面の正反射、表層部の多重反射による光の伝搬、および多重反射条件の良好な部分に発生する干渉

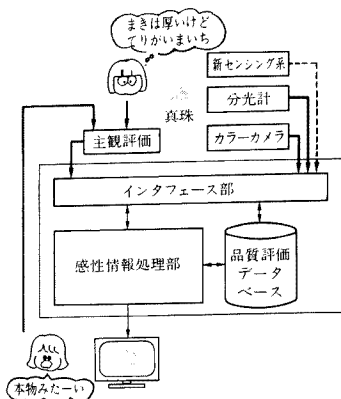


図 2 真珠品質評価システムの概念
Fig.2. Concept of pearl quality evaluation system.

などの光学現象が複雑にからみあった形で発生しており、この複雑さのために、光のふるまいに関する物理モデルを構築するまでには至っていない。

その一方で、こうした複雑な光のふるまいにもかかわらず、真珠の加工工程現場での検査員たちは、ある共通の評価価値観に基づいて、非常に精度の高い品質評価を行っている。

浜揚げされた真珠は、真珠が本来もつ美しさを最大限に引出すと共に、リングやネックレスなどの宝飾品として完成させるための種々の加工が施される。この加工工程に伴って真珠の品質評価が進められるが、その際、形状、色彩、照り、色みなどと呼ばれる項目について評価が下され、それらを総合したものによって品質の評価が決定される。これらの項目のうち、形状についての定量化は比較的容易であるが、色彩、照り、色みなどの項目については概念があいまいで尺度が定性的、しかも主観的であるので、評価の定量化、客観化が非常に難しい。

感性計測技術を真珠品質評価へ適用する今回の試みでは、この色彩、照り、色みという評価量の定量化を目標とした。真珠品質評価のために我々が構築中のシステム構成の概念を図 2 に示す。感性計測技術の第一ステップでは、人間の主観評価と既存のセンシング系からの入力信号とを感性情報処理部において解析・比較し、感性情報を抽出して品質評価データベースに格納する。次に第二ステップでは、抽出した感性情報を出力するようなセンシング系の開発を行う。そして第三ステップにおいて、新しいセンシング系から得られる信号、あるいはデータベースの情報の合成により真珠の光学的特性を再構築した視覚的表示と人間の評価

とを比較し、結果を第一、第二ステップにフィードバックする。この作業を繰返していくことによって、データベースの充実が図られると共に、最適なセンシング系が構築されていく。

この評価システムの構築にあたり、第一ステップとして以下に挙げる二つの実験を行った。

3. 色み・照りに関する評価要因の抽出

〈3・1〉 心理計測実験 真珠の評価を規定する基本的な要因(因子)を明らかにするために、心理計測実験⁶⁾を行い因子の抽出を試みた。

(1) 評価用語の選定 真珠の評価項目を選定するための予備実験として、評価用語の収集を行った。真珠の評価で用いられている用語に辞書などから選んだ色と光沢に関係のある用語を加え、約 50 種類の形容詞群を用意し、次にこれらの用語について仕上げ前工程の検査員に対して聞き取り調査を行った。その結果これらの用語のうち、用語に対応したイメージが検査員の中になくと思われるもの、もしくは検査員間で共通でない、すなわち分散が大きいと判断されるものを除き、最終的に表 1 に示す 19 の評定用語を選定した。

(2) 評定実験 仕上げ工程を担当する 2 人の熟練検査員を対象に、色彩をそろえた 40 サンプルの真珠について評定実験を行った。選定した評定用語それぞれに対し、「かなりそう思う」、「ややそう思う」、「どちらともいえない」、「ややそう思わない」、「かなりそう思わない」の 5 段階の評定結果を得た。

〈3・2〉 実験結果 実験により得られた結果に対し、主因子法による因子分析を行った。表 2 はバリマックス回転後の各因子の因子負荷量である。この結果、三つの有意な因子が求められた。各因子の寄与率は第一因子から順に 58.3、15.6、11.7%である。

第一因子は「軽い」、「かちっとしていいる」など、一般にしまり状態を示すと考えられる用語のグループ

と高い相関を示し、真珠層が薄く均一に巻いている状態を代表していると考えられるので「層の均一性」因子と命名した。また、この因子は光の干渉結果として現れる「色み」の強弱とも当然高い相関をもつことから、業界用語で言うところの「巻き」の良否とも高い相関をもつことが予測される。

第二因子は「表面がよく光る」、「透明感がある」など、表面反射、内部反射、透明度などの要因による光の二次元的な強度分布、すなわち表面の輝き状態を代表していると考えられ「輝き」因子と命名した。この因子はいわゆる「照り」状態を表す因子であると考えられる。

第三因子は「ざらざらした」、「中がメラメラ」など光の二次元的な指向性分布(滑らかさ)を代表していると考えられるので、「面の均一性」因子と命名した。

〈3・3〉 検 討 以上の実験結果を分析検討した結果、以下のことが明らかとなった。

まず、従来あいまいなまま放置されてきた真珠評価因子のグルーピングと寄与率の定量化が実現した。寄与率に関しては、第一因子の寄与率が他と比較して非常に高く、まだ検査員の感覚とのずれが一部に存在することが指摘されたが、これは最初の実験ということで評定用語の選定に不十分な部分があったことと、被験者が 2 名と少なかったことに起因しているものと考えられ、今後の実験規模の拡大に伴って因子の細分化が進むものと期待される。

次に、第三因子すなわち「面の均一性」因子が抽出

表 2 因子負荷量
Table 2. Factor loading.

因 子	第一	第二	第三
寄与率	58.3%	15.8%	11.7%
軽い	-0.93		
巻きが厚い	-0.85		
ピンク	-0.83		
かちっとしていいる	-0.82		
総合評価	-0.69		
色みが強い	-0.67	0.66	
すっとしていいる	-0.67	0.61	
自分の顔が良く映る	-0.64	0.66	
表面がよく光る		0.86	
輪郭がある		0.79	
てりがある		0.78	
透明感がある		0.73	
中がぼけた感じ		-0.72	
ざらざらした			-0.80
表面がでこぼこ			0.78
中がメラメラ			0.75
表面に被膜がある			0.64

絶対値が0.6未満は省く

表 1 評価用語
Table 1. Categories.

1 表面がよく光る	11 照りがある
2 表面に亀甲がある	12 巻きが厚い
3 中がぼけた感じ	13 輪郭がある
4 中がメラメラ	14 軽い
5 表面がでこぼこ	15 明るい
6 すっとしていいる	16 ピンク
7 色みが強い	17 透明感がある
8 自分の顔が良く映る	18 かちっとしていいる
9 ざらざらした	19 総合評価
10 表面に被膜がある	

されたことの意義があげられる。この「面の均一性」は現行の評価項目には取上げられていない因子であり、しかもこれまで検査員が特別の意識をもっていなかったものであるにもかかわらず、品質評価に大きく寄与していることが明らかとなった。このような検査員の意識下に隠れた因子の存在が、従来の各種検査工程の自動化において人間の検査との合致率向上を妨げ「人間のあいまいさ」としてかたづけられてきたことを考えると、図1に示す感性計測技術の手法がこれまでとは違う検査技術を構築できる可能性を示唆したもののといえる。

4. 色彩に寄与する要因の抽出

一般に階層型ニューラルネットは対象の特性を学習的に獲得する性質をもち、学習後のニューラルネットを解析することにより対象の特性を把握できるといわれている⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

武長らは、ニューラルネットの感度解析を行うことにより入力層を選択する手法を提案している⁽⁹⁾。ここではこの手法を基に、評価要因が明らかな色彩評価を取上げ（要因は光の波長）センシング対象とすべき波長の絞り込みを目的として、色彩認識に寄与する波長の特定を試みた。すなわち、色彩認識を行わせる学習済みのニューラルネットの感度解析を行い、色彩認識に寄与する波長を特定した。

〈4・1〉 色彩認識ニューラルネットモデル 本モデルの構成を図3に示す。入力層は250～800 nmの範囲で10 nm間隔に測定した分光スペクトルデータに対応させた56ユニット、出力層は認識結果であるホワイト、クリーム、ブルーの各カテゴリーに対応させた3ユニットから構成した。また中間層については、ユニット数を決定する一般的な方法が知られていないため、経験的に6ユニットと決めた。

学習は各々のカテゴリーの分光スペクトルを入力し、第3章の実験と同一の検査員の判定結果を教師データとしてバックプロパゲーション法により行った。図4に各カテゴリーの分光スペクトルの例を示す。

ここでは本モデルの認識率を求めるために、次のような学習・認識作業を行った。各カテゴリーごとに6個、計18個の分光スペクトルデータの中から、まず各カテゴリーごとに1個、計3個のデータを認識用として残し、他の15個のデータを用いて学習を行う。そして、学習が終わった後に認識用に残した3個のデータについて認識を行い3個の認識結果を得る。次に、先に学習に用いたデータの中から各カテゴリーごとに1個、計3個のデータを残して、同様に他の15個の

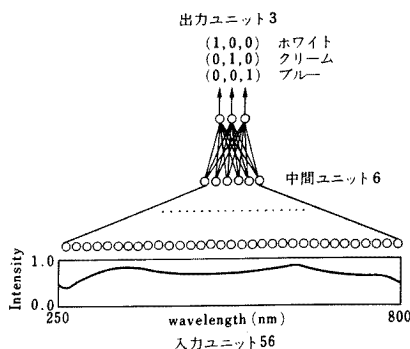


図3 三層ニューラルネットワークの構成
Fig. 3. Three-layered neural network architecture.

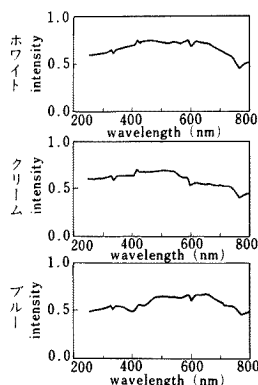


図4 分光スペクトルの例
Fig. 4. Typical spectral envelope of pearl.

データにより学習・認識を行い、新たな3個の認識結果を得る。この作業をすべての分光スペクトルデータについて行くと、最終的に18個の認識結果が得られる。認識率は18個の認識結果のうち正しく認識した個数の比率とする。

〈4・2〉 感度解析による寄与因子の抽出 感度解析のアルゴリズムを以下に示す。

まず、ある認識カテゴリーに着目し、このカテゴリーについての代表的な分光スペクトルデータの一つを決定する。ここでは学習に用いたすべての分光スペクトルデータについて各スペクトルごとに各々の中央値を選び出して構成した分光スペクトルを代表データとした。この代表データを学習済みのニューラルネットに認識させると着目カテゴリーに対応する出力ユニット

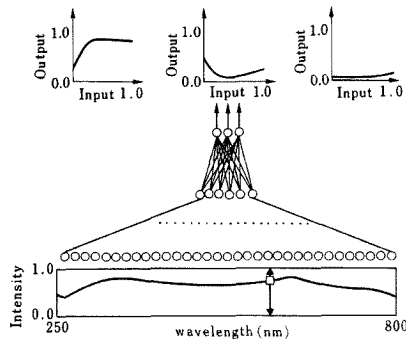


図 5 感度解析
Fig. 5. Sensitivity analysis.

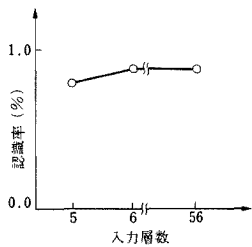


図 6 実験結果
Fig. 6. Experimental results.

表 3 感度特性表
Table 3. Input-output sensitivity.

波長(nm)	250							300							350							400							450							500						
入力No.	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27														
ホワイト																																										
クリーム																																										
ブルー																○	○	○			○																					
波長(nm)	550							600							650							700							750							800						
入力No.	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55														
ホワイト								○	○																																	
クリーム								○																																		
ブルー																																										

が1を、それ以外の出力ユニットが0を出力する。

次に、この代表データを用いて各入力ユニットの感度特性を調べる。ある入力ユニットに着目し強制的にを変化させる。それ以外の入力ユニットへは代表データを入力しておき、そのときの出力ユニットの変化を調べる。もしも出力値に有意な変化がみられなければ、着目ユニットは着目カテゴリーの認識に寄与していないことを意味し、変化がみられるならば（図5），着目ユニットは認識に寄与していることになる。ここで出力値に有意な変化がみられたとは、着目カテゴリーに対応する出力ユニットの出力に一定以上の減少が生じ、かつそれ以外の出力ユニットのうち一つ以上のユニットの出力に一定以上の増加が生じたときとする。この手続きを着目する入力ユニットを変えて行い、すべての入力ユニットについて調べる。

この作業を着目カテゴリーを変えて、同様に行う。結果を表3に示すような感度特性表にまとめると、認識に寄与する入力ユニットが判明する。○印が変化の生じたユニットを示している。390、400、410、440、590、600 nmの計6波長が色彩認識に寄与しているという結果を得た。

〈4・3〉 結果の評価と検討 感度解析結果を評価

するため、以下の実験により認識率を求めた。

まず、認識に寄与していると判断された入力ユニットのみを用いたニューラルネットを構成し、〈4・1〉節で述べた学習・認識作業を行い認識率を求めた。結果は、56個すべての入力ユニットを用いた場合の認識率と差は生じなかった。

次に、比較のために認識に寄与していると判断された6ユニットの中から任意の1個を除いた5個の場合について認識率を求めると、認識率に明らかな低下が見られた。図6にこれらの認識結果を示す。

以上の実験結果から、認識に寄与する因子の特定が行われたことが確認された。この実験ではサンプル数が少ないため信頼性については十分評価されていないものの、こうした手法が評価要因の明らかな対象の評価特性を分析し、評価に寄与する要因を特定する可能性を示したものといえる。

5. む す び

作業者の経験や直感に基づく作業の自動化を実現するための計測技術とされている感性の計測を、産業現場に導入することを目標とした感性計測技術の概念を示すと共に、その第一ステップとして感性情報を抽出

する二つの方法を、真珠の品質評価の定量化に適用した例について報告した。

実験の結果では、多変量解析手法を用いて真珠の品質に関する人間の評価を分析し、評価因子の抽出を行い、真珠評価因子のグルーピングと寄与率の定量化を実現した。また、検査員が特別の意識をもっていない、すなわち検査員の意識下に隠れながらも品質評価に大きく寄与している因子を浮かび上がらせることができた。

また、評価要因が明らかな色彩の認識において、ニューラルネットワークを用いて、実際の真珠品質評価に必要となる要因を特定することに成功した。

ここで特徴的なのは、従来、感性計測技術のためのセンサ情報処理手段と考えられている。ニューラルネットワーク、あるいは多変量解析を、我々の感性計測技術では第一ステップの評価要因抽出のための分析手段ととらえ、この分析結果を受けて最適なセンシング系を構築することを最終の目標としていることである。つまり、例えば第二ステップにおいて、第一ステップで抽出された因子に相当する物理量を計測するセンサの開発を行い（既に存在すればそれを用い、存在しない場合は新規に開発する）、次に、これら複数のセンサを統合したセンシング系（センサフュージョンシステム）の設計において、第一ステップで特定された因子を出力するセンサのみを用いることによって、高速、高精度のセンシング系を構築する。更にこのセンシング系での情報処理系を開発する際に、第一ステップでの寄与率など定量化された心理量に基づいたパラメータチューニングを行う。このように本技術は、センシング系を速やかにかつ適切に開発するために、非常に有用な技術になると考えているのである。今後第一ステップにおいて、更に信頼性の高い分析方法の確立と、物理量との関連付けなどの更に詳細な研究、および第二、第三ステップの研究を進めていく予定である。特に第二、第三ステップの研究において、著者らの提案した感性計測技術におけるセンシング技術と情報処理技術の役割分担の明確化を図っていきたい。

最後に、本研究の遂行にあたり貴重な御助言を賜った大阪大学 井口征士教授に深く感謝いたします。

(平成3年8月5日受付)

文 献

- (1) センサ動向に関する調査研究報告書Ⅲ(昭63)、日本電子工業振興協会
- (2) 片寄・今井・井口：「音楽における感性情報抽出の試み」、人工知能学誌, 3, 748 (昭63)
- (3) 犬飼：「感性評価技術」、日本産業技術振興協会技術資料,

No.177, p.44 (昭63)

- (4) 蓮沼：光沢(昭35) コロナ社
- (5) 釘澤・相田：「真珠光沢測定装置の試作と測定誤差の評価」、応用物理, 55, 499 (昭61)
- (6) 西田・新：社会調査の理論と技法(昭51) 川島書店
- (7) 舟橋：「階層型ニューラルネットワークの原理的機能」、計測と制御, 30, No. 4, 36 (平3)
- (8) R. P. Gorman & T. J. Sejnowski: "Analysis of Hidden Units in a Layered Network Trained to Classify Sonar Targets", *Neural Networks*, 1, 75 (1988)
- (9) 武長・阿部, 他：「感度解析を用いたニューラルネットの入力層の最適化とその数字認識への適用」、電学論 D, 111, 36 (平3-1)



長 田 典 子 (正員)

昭和58年京都大学理学部数学系卒業。同年三菱電機(株)入社。現在、同社産業システム研究所所属。検査システムの視覚情報処理、ロボットの作業プランニングなどの知識情報処理の研究に従事。情報処理学会、システム制御情報学会会員。



電 井 光 仁 (正員)

昭和46年奈良高専電気工学科卒業。同年三菱電機(株)入社。現在、同社産業システム研究所所属。レーザおよび画像処理による表面検査技術、移動体用光通信技術、プラント監視用複合計測技術など各種の光応用計測技術の研究に従事。計測自動制御学会、応用物理学会、日本光学会会員。



赤 根 正 樹 (非会員)

昭和55年京都コンピュータ学院情報工学科卒業。同年田崎真珠(株)入社。現在、同社真珠部所属。真珠加工の工程管理、真珠検査装置の研究開発に従事。



中 嶋 紘 之 (非会員)

昭和36年長崎県立大村高等学校卒業。同年田崎真珠(株)入社。現在、同社真珠部部长。